

ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ АНПА ДЛЯ ПОИСКА И ОБСЛЕДОВАНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

А.В. Инзарцев, А.М. Павин

Институт проблем морских технологий
ДВО РАН

Рассматриваются задачи управления автономным необитаемым подводным аппаратом при поиске и обследовании протяженных кабельных линий с использованием данных фото-видеосистемы и электромагнитного искателя. Приводятся алгоритмы интегральной обработки информации, позволяющие повысить вероятность обнаружения объекта и качество инспекционных работ. Демонстрируются результаты натурных испытаний комплекса программ в составе АНПА.

ВВЕДЕНИЕ

Проведение инспекции подводных протяженных объектов с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов /АНПА/ является перспективным направлением использования последних благодаря их большой автономности. АНПА могут успешно применяться как для инспекции крупноразмерных объектов (трубопроводов) [1,2], так и для объектов, имеющих небольшую площадь поперечного сечения. К объектам последнего типа можно отнести металлосодержащие кабели, проложенные по морскому дну. В ИПМТ ДВО РАН ранее осуществлялись эксперименты по поиску и отслеживанию таких объектов с помощью телевизионной системы [3].

Особенность инспекции таких протяженных объектов (в отличие от трубопроводов) – невозможность их обнаружения с помощью дальномерных устройств (например, эхолотаторов). Альтернативой является использование датчиков, входящих в состав системы технического зрения /СТЗ/ подводного робота:

- телевизионной системы /ТВС/ (с установленными программными средствами распознавания кабеля на изображениях в реальном времени);
- электромагнитного искателя /ЭМИ/ (для металлосодержащего кабеля).

Основная проблема во время автономной инспекции протяженного объекта заключается в управлении подводным аппаратом на основе неполной и/или противоречивой информации от указанных сенсорных устройств. Однако совместная обработка информации, учитывающая особенности работы каждой из подсистем, может существенно повысить качество обнаружения и отслеживания объекта. В работе описывается алгоритм управления подводным роботом вдоль

тонкого металлосодержащего протяженного объекта, заключающийся в циклическом повторении следующих шагов:

- получение данных от ТВС, ЭМИ и навигационной системы /НС/ АНПА;
- интегральная обработка этих данных и построение на их основе модели окружающей среды;
- расчет целевого курса АНПА с использованием составленной модели и текущего положения аппарата.

■ Характеристики используемых систем

ТЕЛЕВИЗИОННАЯ СИСТЕМА

Базовыми функциями ТВС являются идентификация (обнаружение) инспектируемого объекта и сбор данных о его состоянии при движении аппарата вдоль объекта инспекции. Для обеспечения возможности управления АНПА по данным ТВС последняя должна удовлетворять ряду требований по времени получения и обработки изображений. Принимая во внимание скорость ($\approx 0,8$ м/с) и высоту (1,5-3 м) движения аппарата, время получения и обработки одного кадра изображения должно быть не более 2-3 с. При обнаружении объекта на выходе системы распознавания для каждого кадра съемки указывается следующий набор величин (рис. 1):

- направление распознанного протяженного объекта относительно продольной оси изображения α^{TBC} ;
- расстояние от центра кадра до линейного объекта ρ^{TBC} ;
- длина видимой части объекта.

Детектирование кабеля сводится к поиску наиболее длинного и прямого объекта, присутствующего на фотоизображении, и получению для

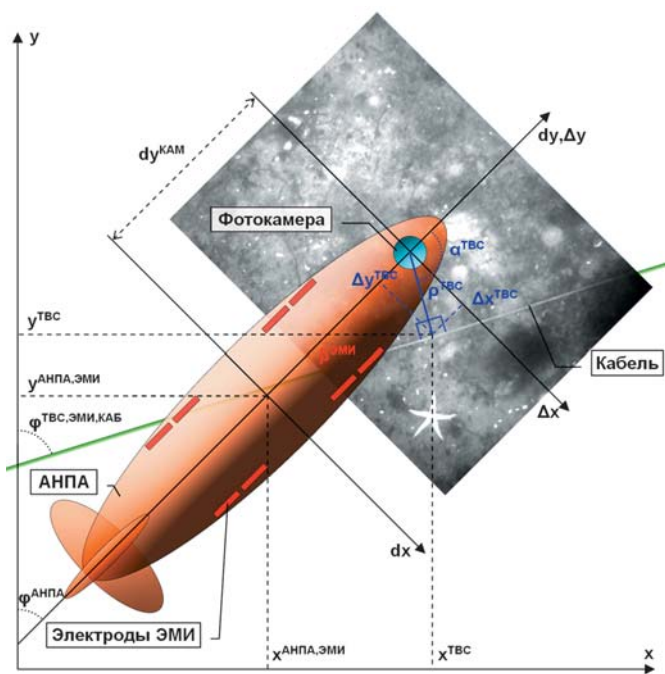


Рис. 1. Схема расположения устройств и систем координат АНПА

него перечисленных характеристик. При этом система распознавания вырабатывает довольно много ложных обнаружений. Дело в том, что на морском дне часто находятся объекты, которые ввиду наличия прямолинейных участков могут быть приняты за искомый (морские звезды, водоросли, песчаные разводы, мусор техногенного характера и т.д.). С другой стороны, объект может быть просто не виден на фотографии (заилен, закрыт другими объектами) и в результате пропущен.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ИСКАТЕЛЬ

Устройство электромагнитного искателя [4] состоит из четырех пар электродов, образующих три пары излучающих и принимающих диполей (рис. 1). Излучающие диполи расположены под острым углом к продольной оси АНПА, а принимающие диполи – перпендикулярны излучающим. Таким образом, попеременно измеряя потенциалы на каждой паре электродов и сравнивая их между собой, можно получить направление протяженного объекта относительно продольной оси корпуса АНПА $\beta^ЭМИ$ и оценку вероятности существования металлосодержащего объекта вблизи аппарата (величина потенциала и скорость ее изменения при пересечении кабеля).

ЭМИ идентифицирует металлосодержащий протяженный объект (и определяет угол пересечения с ним) при заходе на него под углами 30° - 60° к продольной оси АНПА. Система работает неуверенно при движении АНПА вдоль кабеля

(скорость изменения потенциала близка к нулю) и поперек (излучающими электродами наводится слишком малый потенциал).

БОРТОВАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА

Построение адекватной модели окружающей среды АНПА требует применения высокоточной навигационной системы. Главным образом важны точные измерения локальных перемещений аппарата за небольшой интервал времени (порядка 10 мин). Во время движения по кабелю аппарат находится на небольшом отстоянии от дна (1,5-3 м), поэтому для счисления траектории АНПА могут быть использованы данные от доплеровского лага, инерциального или магнитного указателя курса. При использовании разработанного в ИПМТ ДВО РАН акустического доплеровского лага накапливающаяся с течением времени ошибка не превышает несколько десятков метров за 1 ч работы, что вполне допустимо для обеспечения надежного управления аппаратом при движении вдоль объекта инспекции.

■ Модель среды

При построении общей модели среды данные от ТВС и ЭМИ приводятся к единому формату. Каждая из подсистем периодически выдает информацию, на основании которой могут быть вычислены следующие параметры искомого объекта:

- положение протяженного объекта в системе координат по счислению;
- направление объекта в данной точке;
- оценка вероятности существования объекта с заданными координатами и направлением в текущий момент времени.

ТЕЛЕВИЗИОННАЯ СИСТЕМА

Направление местоположение объекта в инерциальной системе координат по данным телевизионной системы вычисляется следующим образом (рис. 1.):

$$\begin{aligned} \varphi^{ТВС} &= \varphi^{АНПА} + \alpha^{ТВС} - \text{sign}(\alpha^{ТВС}) \cdot 90^\circ; \\ x^{ТВС} &= x^{АНПА} + (\Delta x^{ТВС} + dx^{КАМ}) \cdot \cos(\varphi^{АНПА}) + (\Delta y^{ТВС} + dy^{КАМ}) \cdot \sin(\varphi^{АНПА}); \\ y^{ТВС} &= y^{АНПА} + (\Delta y^{ТВС} + dy^{КАМ}) \cdot \cos(\varphi^{АНПА}) - (\Delta x^{ТВС} + dx^{КАМ}) \cdot \sin(\varphi^{АНПА}), \end{aligned}$$

где:

- $\varphi^{АНПА}, x^{АНПА}, y^{АНПА}$ – курс и координаты АНПА в инерциальной СК;
- $\varphi^{ТВС}, x^{ТВС}, y^{ТВС}$ – направление и положение объекта в инерциальной СК;
- $\alpha^{ТВС}, \Delta x^{ТВС}, \Delta y^{ТВС}$ – угол и положение распознанного объекта на кадре ТВС;

$dx^{КАМ}$, $dy^{КАМ}$ – местоположение фотокамеры на борту АНПА.

В свою очередь, координаты объекта на кадре ТВС ($\Delta x^{ТВС}$, $\Delta y^{ТВС}$) рассчитываются по следующим формулам:

$$\Delta x^{ТВС} = \rho^{ТВС} \cdot \sin(\alpha^{ТВС}),$$

$$\Delta y^{ТВС} = \rho^{ТВС} \cdot \cos(\alpha^{ТВС}),$$

где:

$\rho^{ТВС}$ – расстояние от центра кадра до протяженного объекта;

$\alpha^{ТВС}$ – направление протяженного объекта (от продольной оси АНПА к прямой ρ).

Вероятность существования объекта в данной точке оценивается исходя из длины объекта на фотоизображении. При этом величина оценки прямо пропорциональна длине видимого фрагмента объекта. Конкретная зависимость устанавливается как нечеткая функция принадлежности и подбирается исходя из диапазона возможных направлений кабеля в данном районе. Контакты ТВС, полученные в результате инспекции участка кабеля (генеральным направлением около

180 градусов), и пример функции принадлежности приведены на рис. 2.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ИСКАТЕЛЬ

Положением объекта по данным электромагнитного искателя является местонахождение аппарата в момент максимума потенциалов на приемных электродах. Направление кабеля в инерциальной системе координат $\varphi^{ЭМИ}$ определяется путем сложения величин курса АНПА $\varphi^{АНПА}$ и угла кабеля относительно продольной оси АНПА $\beta^{ЭМИ}$ (рис. 1).

Оценка вероятности существования искомого объекта определяется исходя из величины потенциала и скорости ее нарастания за интервал времени, предшествующий максимуму. Конкретная зависимость подбирается экспериментально исходя из характеристик устройства, скорости (и высоты) движения АНПА и свойств объекта инспекции (электромагнитные характеристики, диаметр, толщина оболочки и др.). Эта зависимость также является нечеткой функцией принадлежности, которая определяет степень

Рис. 2
Фильтрация данных ТВС:
а – статистика контактов ТВС,
б – нечеткая функция наличия
объекта

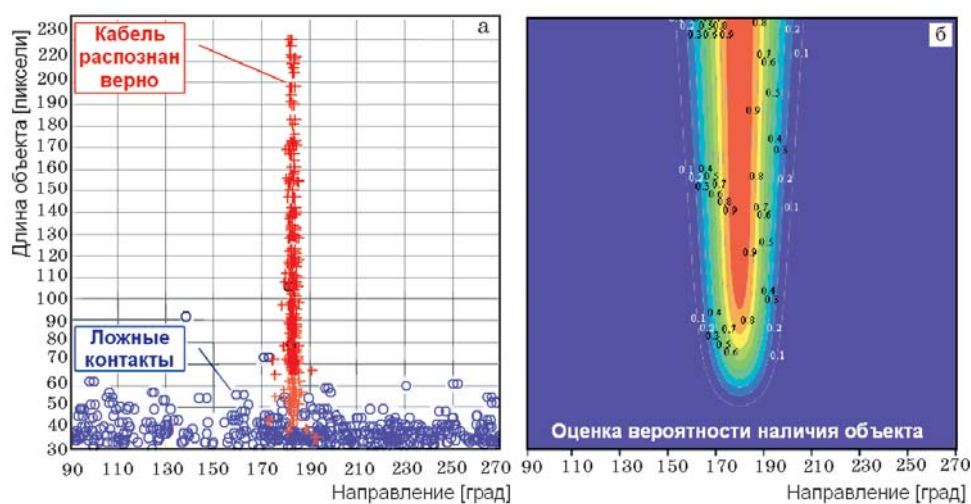
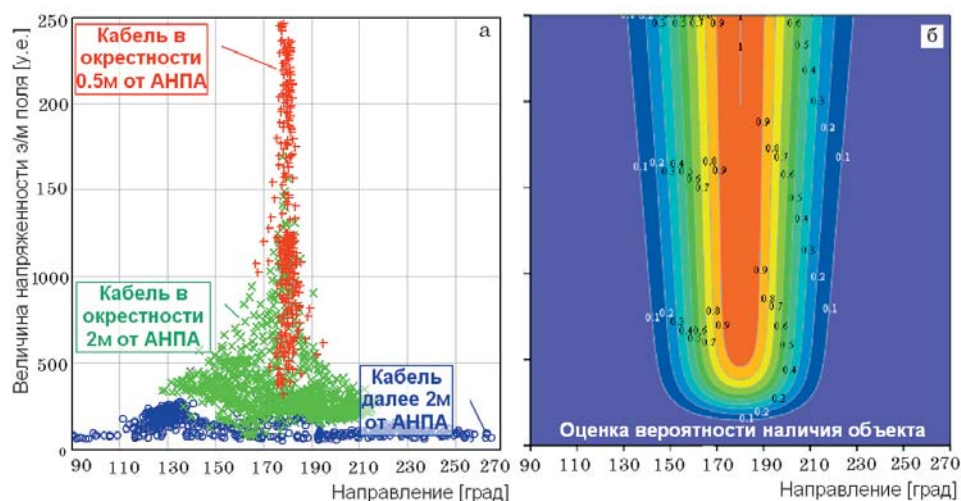


Рис. 3
Фильтрация данных ЭМИ:
а – статистика сигналов ЭМИ,
б – нечеткая функция наличия
объекта



уверенности в существовании объекта в данной точке. На рис. 3 изображены величины напряженности электромагнитного поля по данным ЭМИ при обследовании участка кабеля и используемая функция принадлежности.

СОВМЕСТНАЯ ОБРАБОТКА ТЕЛЕВИЗИОННОЙ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ И НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Показателем наличия кабеля для каждой из подсистем (ЭМИ и ТВС) в момент времени t является величина p_t , (рис. 4: окружности – контакты ЭМИ, точки – контакты ТВС). Для учета контактов, предшествующих текущему моменту времени, производится их накопление (на рис. 4 пунктирные линии) по следующей формуле:

$$P_t^{ЭМИ,ТВС} = K^{ЭМИ,ТВС} \cdot P_{t-1}^{ЭМИ,ТВС} + p_t^{ЭМИ,ТВС},$$

где: $P_t^{ЭМИ,ТВС}$ – суммарная величина контактов к моменту времени t (для ЭМИ и ТВС);

$K^{ЭМИ,ТВС}$ – коэффициент затухания («забывания» информации);

$p_t^{ЭМИ,ТВС}$ – величина контакта соответствующей подсистемы в момент времени t .

Величина K лежит в пределах (0,1) и подбирается с учетом характеристик распознающих подсистем. Для ЭМИ она выше, чем для ТВС, поскольку у ЭМИ вероятность ложных срабатываний существенно меньше. К тому же частота появления контактов ЭМИ ниже, так как они возникают только во время пересечения кабеля или металлического предмета. Суммарная составляющая оценки вероятности наличия кабеля (рис. 4: сплошная линия) в окрестности АНПА определяется как взвешенная сумма оценок вероятностей обеих подсистем. Весовые коэффициенты при этом определяют степень доверия к каждой из подсистем:

$$P_t^{ЭМИ+ТВС} = W^{ЭМИ} \cdot P_t^{ЭМИ} + W^{ТВС} \cdot P_t^{ТВС},$$

где: $P_t^{ЭМИ+ТВС}$ – суммарная величина оценки вероятности наличия кабеля в окрестности подводного робота;

$W^{ЭМИ}, W^{ТВС}$ – весовые коэффициенты доверия к каждой из подсистем.

Интегральная оценка местоположения протяженного объекта (координаты и направление) рассчитывается аналогично, исходя из величин оценки наличия кабеля (по ЭМИ и ТВС) и степени доверия к каждой подсистеме:

$$(x, y, \varphi)_t^{sum} = K^{sum} \cdot (x, y, \varphi)_{t-1}^{sum} + w^{ЭМИ} \cdot p_t^{ЭМИ} \cdot (x, y, \varphi)_t^{ЭМИ} + w^{ТВС} \cdot p_t^{ТВС} \cdot (x, y, \varphi)_t^{ТВС};$$

$$P_t^{sum} = K^{sum} \cdot P_{t-1}^{sum} + w^{ЭМИ} \cdot p_t^{ЭМИ} + w^{ТВС} \cdot p_t^{ТВС};$$

$$(x, y, \varphi)_t = (x, y, \varphi)_t^{sum} / P_t^{sum},$$

где:

$(x, y, \varphi)_t^{sum}$ – интегральная оценка местоположения протяженного объекта;

$(x, y, \varphi)_t$ – положение объекта в момент времени t ;

$w^{ЭМИ}, w^{ТВС}$ – вес (степень доверия) подсистемы в определении координат объекта;

K^{sum} – коэффициент затухания («забывания» информации).

■ Управление АНПА вдоль протяженного объекта

Решение задач инспекции требует управления подводным аппаратом таким образом, чтобы траектория АНПА была как можно ближе к протяженному объекту и лежала вдоль него. При этом если существует устойчивый контакт от ТВС (т.е. кабель различим на подряд идущих кадрах), то аппарат может двигаться непосредственно над кабелем. В случае отсутствия видеоконтакта АНПА должен двигаться «змейкой» с использованием данных от ЭМИ, постоянно пересекая объект. Подобное движение обеспечивает надежное отслеживание кабеля «в среднем». Таким образом, можно ввести обратно пропорциональную зависимость между углом захода на кабель и величиной суммарной оценки наличия кабеля $P_t^{ЭМИ+ТВС}$. Кроме того, аналогичную зависимость необходимо ввести между боковым отклонением (дистанция, на которую должен отходить аппарат от протяженного объекта) и оценкой наличия кабеля $P_t^{ЭМИ+ТВС}$.

Во время выполнения поисковой траектории (на первом этапе) АНПА движется до возникновения ЭМИ-контакта. Этим предотвращаются лишние поисковые движения при получении ложных данных от ТВС. Далее в течение нескольких минут аппарат движется «змейкой» вдоль объекта (рис. 5 – слева, рис. 6, 7, 8 – сверху), используя данные от ЭМИ

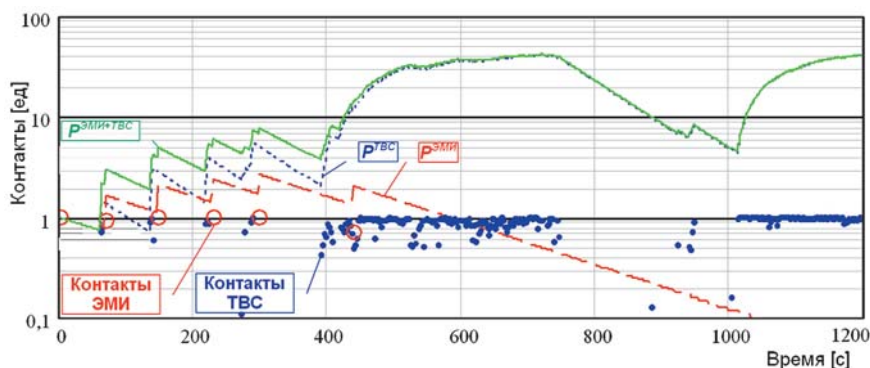


Рис. 4. Контакты ЭМИ и ТВС во время движения по кабелю

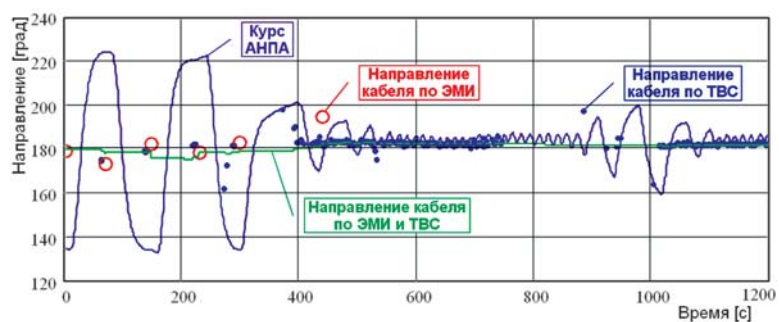


Рис. 5. Направление кабеля, определенное по ЭМИ и ТВС

и ТВС для набора статистики. Если по прошествии этого времени суммарная оценка наличия кабеля достаточно велика (величина должна быть не меньше трех ЭМИ-контактов), то можно считать, что найден протяженный объект. В противном случае найденный объект не является протяженным. Дальнейшее движение строится по указанным выше зависимостям с изменением углов захода на кабель и варьированием величины

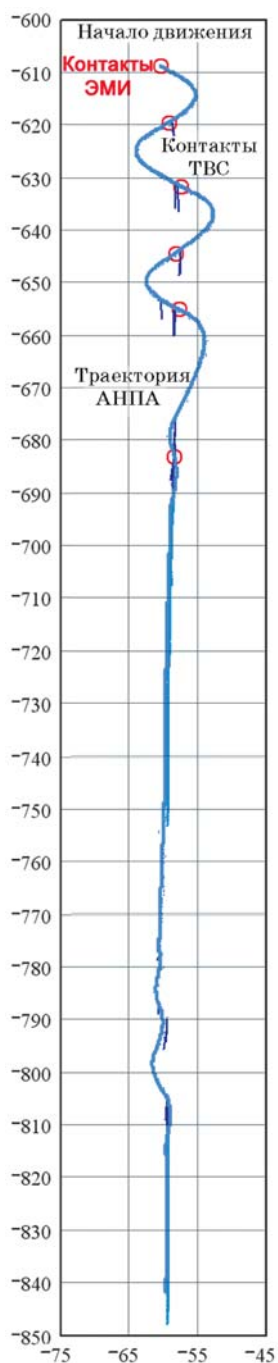


Рис. 6. Контакты ЭМИ и ТВС

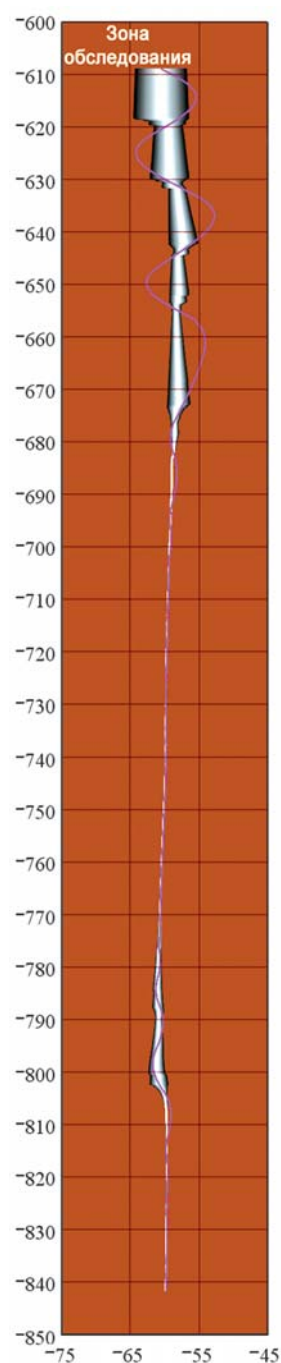


Рис. 7. Модель среды

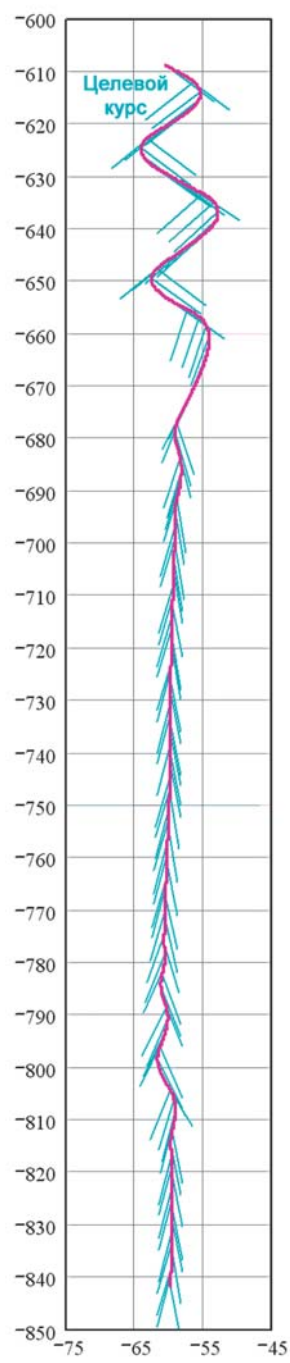


Рис. 8. Целевые курсы АНПА

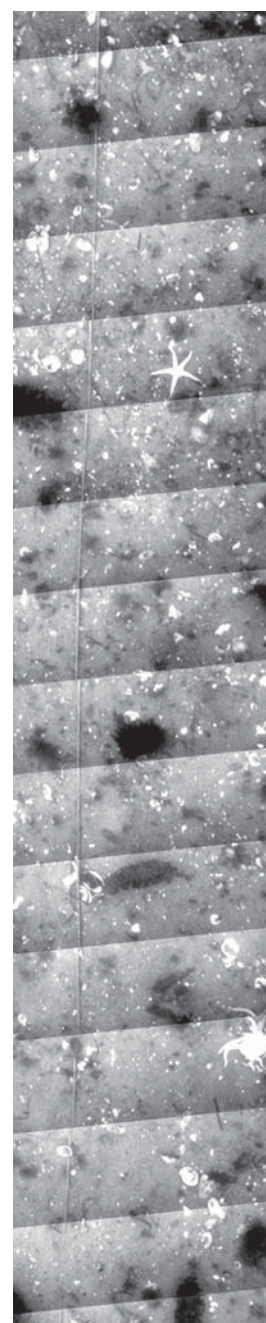


Рис. 9. Мозаичная последовательность кадров на одном из участков движения АНПА вдоль кабеля

отхода от кабеля в зависимости от суммарной оценки наличия объекта (рис. 5-8). В итоге траектория движения АНПА представляет собой колебательное движение вдоль кабеля. При этом амплитуда колебаний обратно пропорциональна вероятности нахождения кабеля вблизи АНПА. При максимальной оценке вероятности наличия кабеля движение вырождается в прямую линию. При уменьшении оценки (потеря кабеля) вновь возникают колебательные движения, т.е. АНПА вновь начинает производить поиск объекта. При этом амплитуда колебаний возрастает по мере уменьшения вероятности наличия объекта.

■ Результаты испытаний

Описанный алгоритм был реализован как одна из подзадач в составе координирующего уровня системы управления АНПА. Испытания системы проводились с использованием специально проложенного по морскому дну фрагменту кабеля длиной около 800 м. На рис. 4-6 продемонстрированы результаты испытаний системы в течение первых 20 мин движения АНПА по кабелю после его обнаружения. Графики 6-8 отображают движение АНПА в горизонтальной плоскости. На рис. 6 изображены траектория АНПА и контакты ЭМИ и ТВС, рис. 7 показывает зону обследования, которая сужается к кабелю при появлении большого количества контактов и расширяется – при их уменьшении (светлые участки – наиболее вероятное местоположение кабеля, темные – маловероятное). На графике 8 линиями отмечены целевые курсы для исполняющего уровня системы управления АНПА (с интервалом в 10 с).

После обнаружения кабеля (в первой его четверти) аппарат движется змейкой вдоль генерального направления кабеля. При этом набирается статистика контактов и сужается зона предполагаемого обследования (рис. 7: площадь под траекторией АНПА). По истечении четырех минут от начала обследования АНПА начинает совершать поисковые движения, руководствуясь границами зоны обследования. Ближе к концу

кабеля появляется участок, на котором кабель не видно (отсутствуют контакты ТВС) и АНПА плавно переходит в режим движения «расходящаяся змейка». При появлении большого количества ТВС-контактов возобновляется движение вдоль кабеля. В результате весь тестовый отрезок кабеля был пройден. При этом кабель практически всё время находился в поле зрения ТВ-камеры. На рис. 9 приведен фрагмент последовательности кадров, полученных с фотосистемы при движении аппарата вдоль кабеля. Средняя скорость движения АНПА составила около 0,35 м/с, высота над грунтом – 1,7 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод интегрирования данных от компонентов СТЗ был реализован в системе управления одного из аппаратов ИПМТ ДВО РАН и успешно прошел испытания летом 2007. К достоинствам модели интегрирования можно отнести низкую ресурсоемкость применяемых алгоритмов, а также достаточно высокую вероятность обнаружения и отслеживания объекта при низкой вероятности ложных срабатываний. Перспективы дальнейшего развития модели состоят в интегрировании данных большего количества устройств для обеспечения движения АНПА вдоль протяженных объектов разных классов (например – ЭМИ, ТВС и многолучевой эхолокационной системы для управления аппаратом при движении вдоль трубопроводов).

Авторы выражают признательность руководителю экспедиционных работ, проводимых с использованием АНПА, Рылову Н.И., – за поддержку данного исследования, а также сотрудникам Института Борейко А.А. и Варламову Д.А. – за проведенную модернизацию ТВС, которая была необходима для интегрирования описанного алгоритма в состав системы управления АНПА, Кукарских А.К. – за вклад в разработку электромагнитного искателя. Кроме того, в работе был использован алгоритм сшивки изображений, разработанный Щербатюком А.Ф. и Мунном С.А.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инзарцев А.В., Павин А.М. Планирование движения АНПА вдоль трубопровода на основе эхолокационной информации // Матер. междунар. науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения мирового океана». Владивосток, 14-17 сентября 2005 г. Владивосток: Дальнаука, 2005. С. 33-39.
2. Inzartsev A. V., Pavin A. M. AUV Behavior Algorithm While Inspecting of Partly Visible Pipeline // Proc. of the OCEANS 2006 MTS/IEEE Conf., September 18-21, 2006, Boston, MA, USA.
3. Ваулин Ю.В., Щербатюк А.Ф. Система отслеживания протяженных объектов на основе телевизионной информации для подводного робота // Морские технологии. Владивосток: Дальнаука, 2000. Вып. 3. С. 80-91.
4. Агеев М.Д., Кукарских А.К. Электромагнитный гидролокатор для обнаружения и отслеживания протяженных объектов с борта АНПА // Морские технологии. Владивосток: Дальнаука, 2001. Вып. 4. С. 71-90.